

Mistura obrigatória, subsídio voluntário: o efeito de políticas energéticas sobre o comércio internacional de (bio)combustíveis

Mandatory blending, voluntary subsidy: the effect of energy policies on international trade in (bio)fuels

Michelle Márcia Viana Martins

Professora no Departamento de Economia (DEE) na Universidade Federal de Viçosa (UFV).
Viçosa, MG, Brasil

Jennyfer Ferreira da Silva

Mestranda em Economia (DEE) na UFV. Viçosa, MG, Brasil

Scarlett Queen Almeida Bispo

Pesquisadora no Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), Brasília, DF, Brasil

Marcelo José Braga Nonnenberg

Técnico de Planejamento e Pesquisa no IPEA, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

GT 01 - Mercados agrícolas e comércio exterior

Resumo: A coexistência de mandatos de mistura obrigatória e subsídios a combustíveis fósseis configura uma incoerência de política energética cuja dimensão comercial permanece pouco investigada. Este estudo avalia como esses dois instrumentos afetam o comércio internacional de biocombustíveis e derivados de petróleo. A partir da análise com 204 países (2012-2024) e com um painel de intensidade de mandatos de mistura (percentuais por produto, país e ano) para 50 economias, estima-se modelos gravitacionais estruturais em duas etapas. Os subsídios fósseis apresentam efeito negativo sobre as importações de biodiesel, mas não sobre as de etanol, refletindo a competição direta entre biodiesel e diesel subsidiado. Cada ponto percentual adicional no mandato de mistura está associado a 16,9% mais demanda por biocombustíveis importados. Mandatos de biocombustíveis não reduzem as importações de derivados de petróleo: o deslocamento não opera pelo lado da demanda. Pelo lado da oferta, mandatos e subsídios do exportador estão associados a maiores exportações de derivados na comparação entre países, mas perdem significância quando se isola a variação temporal dentro de cada exportador.

Palavras-chave: biocombustíveis; combustíveis fósseis; mandatos de mistura; modelo gravitacional estrutural; segurança energética.

Abstract: The coexistence of blending mandates and fossil fuel subsidies creates an energy policy incoherence whose trade dimension remains largely unexplored. This study assesses how these two instruments shape international trade in biofuels and petroleum derivatives. Using product-specific panels for 204 countries (2012-2024) and a blending mandate intensity panel (percentages by product, country, and year) for 50 economies, we estimate two-stage structural gravity models. Fossil fuel subsidies reduce biodiesel imports but not ethanol imports, reflecting the direct competition between biodiesel and subsidized diesel. Each additional percentage point in the blending mandate is associated with 16.9% higher multilateral demand for imported biofuels. Biofuel mandates do not reduce petroleum derivative imports: displacement does not operate on the demand side. On the supply side, exporter mandates and subsidies are associated with higher derivative exports in cross-country comparisons but lose significance when within-exporter temporal variation is isolated.

Keywords: biofuels; fossil fuels; blending mandates; structural gravity model; energy security.

1. Introdução

Conflitos geopolíticos como os que têm ocorrido no Oriente Médio, envolvendo Estados Unidos, Israel e Irã, e entre Rússia e Ucrânia, afetam os preços do barril de petróleo Brent e a estabilidade das cadeias de fornecimento de energia (Caldara e Iacoviello, 2022). O risco geopolítico opera por dois canais opostos sobre os preços do petróleo: o canal de atividade econômica (a incerteza reduz consumo e investimento, pressionando preços para baixo) e o canal de risco de oferta (mercados financeiros precificam a possibilidade de interrupção futura,

pressionando preços para cima), e o efeito líquido depende da natureza e da duração do conflito (Ferrari Minesso, Lappe e Rößler, 2024).

Em 2022, quando a Rússia invadiu a Ucrânia, o preço do Brent aumentou quase 30% nas duas primeiras semanas (Ferrari Minesso, Lappe e Rößler, 2024). Em resposta a esses tipo de choque, os países podem ampliar os subsídios aos combustíveis fósseis para conter repasses de preço ao consumidor e/ou elevar a mistura obrigatória de biocombustíveis, com o argumento de que essas medidas ampliam a oferta de combustível no mercado doméstico e reduzem a dependência de importações concentradas em regiões instáveis. A Agência Internacional de Energia (IEA, 2023) documenta que a segurança energética justificou a expansão de políticas de biocombustíveis após a crise de 2022, colocando os biocombustíveis no centro das estratégias de mitigação, não apenas como alternativa ambiental, mas como mecanismo de proteção macroeconômica contra a volatilidade de preços de derivados.

Tao et al. (2025), analisando redes de comércio de petróleo de 42 economias entre 2009 e 2023, mostram que o risco geopolítico aumenta a centralidade e a intensidade do comércio de petróleo, inibindo ao mesmo tempo a difusão de energias renováveis e reforçando a dependência de combustíveis fósseis, o que torna a análise dos subsídios fósseis como barreira à transição energética no comércio internacional particularmente relevante. Além disso, a oferta mundial de derivados de petróleo é concentrada em regiões sujeitas a instabilidade: Arábia Saudita, Rússia, Iraque, Canadá e Emirados Árabes Unidos respondem por mais de 40% das exportações globais, e três desses países estão localizados em zonas de conflito persistente. Essa concentração gera vulnerabilidade para os importadores, sobretudo nos setores de transporte e logística, que permanecem dependentes de combustíveis líquidos. Os biocombustíveis, por serem compatíveis com motores de combustão interna e com a infraestrutura de distribuição existente, constituem a alternativa mais imediata para reduzir essa dependência.

A produção mundial de biocombustíveis atingiu cerca de 190 bilhões de litros em 2023, com Estados Unidos, Brasil e Indonésia concentrando mais de 70% desse volume (Energy Institute, 2024). Mandatos de mistura adotados em mais de 60 países impulsionam a expansão da demanda, que deve crescer 38 bilhões de litros entre 2023 e 2028 (IEA, 2024b). Apesar desse crescimento, a parcela comercializada internacionalmente permanece contida: em torno de 15% para biodiesel e 8% para etanol (OECD/FAO, 2025). Duas dimensões de política operam em direções opostas sobre essa dinâmica: de um lado, mandatos de mistura obrigatória criam demanda por biocombustíveis; de outro, subsídios a combustíveis fósseis alteram preços relativos e reduzem a competitividade de alternativas renováveis. A IEA registrou mais de US\$ 1 trilhão em subsídios ao consumo de fósseis em 2022 (IEA, 2023). Parry et al. (2025) pontuam

subsídios explícitos de US\$ 725 bilhões e implícitos de US\$ 6,7 trilhões quando se incluem externalidades não precificadas.

No Brasil, segundo maior produtor mundial de biocombustíveis, foram concedidos R\$ 334,6 bilhões em subsídios fósseis nos últimos cinco anos, numa proporção de R\$ 4,52 em incentivos fósseis para cada R\$ 1 em renováveis em 2023 (INESC, 2025). Na esfera multilateral, o Acordo sobre Mudança Climática, Comércio e Sustentabilidade (ACCTS), assinado em 2024, representa o primeiro arcabouço internacional vinculante sobre reforma de subsídios fósseis (Verkuijl et al., 2024). Nos Estados Unidos, o One Big Beautiful Bill Act de 2025 estendeu o crédito fiscal 45Z para combustíveis limpos, com custo estimado de US\$ 25,7 bilhões em dez anos.

A coexistência de mandatos de mistura e subsídios fósseis no mesmo país configura uma incoerência de política que este estudo investiga empiricamente a partir de três questões de pesquisa. A primeira é se os subsídios a combustíveis fósseis reduzem o comércio internacional de biocombustíveis, porque quando o preço do diesel e da gasolina é subsidiado, a demanda por biocombustíveis importados tende a se reduzir, mesmo na presença de mandatos de mistura (hipótese 1 - H1). A segunda é se mandatos de mistura deslocam importações de derivados de petróleo, porque quando um país aumenta o percentual de biodiesel na mistura, a quantidade de combustíveis fósseis importado necessária para atender a demanda de transporte poderia diminuir (H2). A terceira é se mandatos de mistura e subsídios fósseis do exportador afetam as exportações desses produtos (H3).

O estudo constrói um painel de intensidade de mandatos de mistura por produto, país e ano para 50 países (2012-2024), permitindo estimar o efeito dos subsídios fósseis e mandatos sobre o comércio bilateral de biocombustíveis e, em paralelo, sobre o comércio de derivados de petróleo, testando a hipótese de deslocamento, ou seja, se mandatos de biocombustíveis reduzem os fluxos comerciais de derivados de petróleo ao substituir parte da demanda ou da oferta de combustíveis fósseis. A identificação dos efeitos de variáveis de política unilateral emprega a abordagem em duas etapas proposta por Beverelli et al. (2024) e Heid, Larch e Yotov (2021), conforme as recomendações atualizadas de Larch, Shikher e Yotov (2025), dentro do arcabouço gravitacional estrutural e respeitando as condições de consistência teórica impostas por Anderson e van Wincoop (2003).

Os resultados revelam que o efeito dos subsídios fósseis é assimétrico entre produtos (negativo para biodiesel, positivo para etanol), que mandatos aumentam a demanda por biocombustíveis com intensidade diferenciada por produto, e que mandatos não reduzem as importações de derivados de petróleo pelo lado da demanda. Pelo lado da oferta, mandatos e

subsídios do exportador aumentam as exportações na comparação entre países, mas perdem significância na variação temporal dentro de cada exportador.

O artigo contém quatro seções além desta introdução. A seção 2 revisa a literatura sobre subsídios fósseis, mandatos de mistura e comércio de biocombustíveis. A seção 3 apresenta a metodologia. A seção 4 apresenta e discute os resultados. A seção 5 traz considerações finais.

2. Revisão da Literatura

Subsídios a combustíveis fósseis distorcem preços relativos ao reduzir o custo efetivo de combustíveis convencionais. Kojima (2016) mostra que subsídios fósseis enfraquecem a competitividade de alternativas de menor carbono mesmo quando estas recebem incentivos direcionados, e de Gorter e Just (2010) formalizam a interação entre instrumentos ao mostrar que o resultado líquido depende do desenho simultâneo de subsídios e mandatos. Burniaux, Chateau e Sauvage (2011), em modelo de equilíbrio geral, mostram que a remoção multilateral de subsídios fósseis ao consumo reduziria o comércio de gás natural em 6% e realocaria fluxos comerciais em favor de países da OCDE. Argueyrolles, Heimann e Delzeit (2025), também com equilíbrio geral, mostram que reformas de subsídios aumentam a competitividade de biocombustíveis e reduzem o custo fiscal de cumprimento de mandatos.

Apanisile e Oyelami (2025) aplicam modelo gravitacional a 167 países e encontram que subsídios fósseis reduzem a difusão de tecnologias de baixo carbono no comércio internacional, sendo o estudo mais próximo deste em termos de abordagem empírica, mas sem diferenciar por produto de biocombustível nem incorporar mandatos de mistura. No âmbito multilateral, a OMC adotou um Plano de Trabalho 2024-2025 sobre reforma de subsídios fósseis (OMC, 2024), mas sem estimativas dos efeitos comerciais dessas reformas. A lacuna na literatura é o teste direto do efeito dos subsídios fósseis sobre o comércio bilateral de biocombustíveis diferenciado por produto, porque diesel e biodiesel competem diretamente no tanque (a mistura B15 significa 15% de biodiesel e 85% de diesel), enquanto gasolina e etanol competem de forma mais indireta, já que a mistura obrigatória fixa a proporção independentemente do preço relativo.

Mandatos de mistura obrigatória constituem o instrumento regulatório mais difundido para criação de demanda por biocombustíveis, com mais de 70 países mantendo alguma forma de obrigação em 2024, em níveis que variam de 2% a 35% para biodiesel e de 5% a 30% para etanol (REN21, 2024; USDA FAS, 2024). O nível do mandato atua como piso de demanda: dado um percentual obrigatório, a quantidade consumida de biocombustível é função do consumo total de combustível para transportes. O efeito sobre o comércio internacional é ambíguo: pode aumentar importações quando a produção doméstica é insuficiente (caso do Canadá após o Clean

Fuels Standard; OECD/FAO, 2025), ou estimular a produção doméstica (caso da Indonésia com B35; USDA FAS, 2024).

A variação nos mandatos entre países e ao longo do tempo fornece uma fonte de identificação que não depende de choques de preço, e os mandatos de etanol e biodiesel costumam diferir dentro de um mesmo país: o Brasil em 2024 operava com E27 e B14, enquanto a Indonésia aplicava B35 para biodiesel sem mandato efetivo para etanol. Essa variação por produto permite explorar dimensões de identificação que não estariam disponíveis em variáveis que variam apenas no nível importador-ano. Até este estudo, não há na literatura a compilação de um painel de intensidade de mandatos (percentuais por produto, país e ano) para uso em modelos gravitacionais.

Lamers et al. (2011) classificam as políticas que estruturam os mercados de biocombustíveis em três categorias (consumo, produção e comerciais) e mostram que tarifas e mandatos determinam volumes e rotas de comércio com mais intensidade do que oscilações de preço, mas a análise é descritiva. Salamon et al. (2006) estimaram o modelo gravitacional para etanol e mostraram que distância e vínculos institucionais explicam parte da variação bilateral, mas o estudo é anterior à expansão dos mandatos de biodiesel e não diferencia entre produtos nem incorpora subsídios fósseis. A contribuição deste estudo é integrar, em um mesmo arcabouço gravitacional, subsídios fósseis e mandatos de mistura, estendendo a análise ao comércio de derivados de petróleo para testar a hipótese de deslocamento.

3. Metodologia

A análise emprega o modelo gravitacional de comércio internacional, introduzido por Tinbergen (1962) e microfundamentado por Anderson (1979) a partir de preferências com elasticidade de substituição constante (CES). Anderson e van Wincoop (2003) avançaram no modelo ao incorporar os termos de resistência multilateral, demonstrando que a omissão desses termos gera viés nas estimativas de custos bilaterais de comércio. Baldwin e Taglioni (2006) sistematizaram os três erros mais frequentes na estimação de modelos gravitacionais: o gold medal mistake (erro de ouro), que é a omissão dos termos de resistência multilateral; o silver medal mistake (prata), que consiste em usar a média dos fluxos bilaterais entre dois países em vez de fluxos direcionais separados; e o bronze medal mistake (bronze), que é deflacionar fluxos nominais de comércio pelo índice de preços dos Estados Unidos, introduzindo correlação espúria. A especificação adotada neste estudo evita os três erros: o gold medal mistake é corrigido pela inclusão de efeitos fixos, que absorvem os termos de resistência multilateral (discutidos posteriormente); o silver medal mistake é evitado pelo uso de fluxos direcionais (exportações de i para j); e o bronze medal mistake é evitado pelo uso de valores nominais sem

deflação, conforme recomendado por Santos Silva e Tenreyro (2006) no contexto do estimador Poisson Pseudo-Maximum Likelihood (PPML).

A equação gravitacional estrutural para o comércio bilateral do produto p entre os países i e j no período t assume a forma:

$$X_{ijpt} = \frac{Y_{ipt} E_{jpt}}{Y_{pt}} \left(\frac{\tau_{ijpt}}{P_{jpt} \Pi_{ipt}} \right)^{1-\sigma_p} \quad (1)$$

X_{ijpt} representa o comércio bilateral; Y_{ipt} e E_{jpt} são a produção do exportador e a despesa do importador; Y_{pt} é a produção mundial do setor; τ_{ijpt} são os custos bilaterais de comércio; σ_p é a elasticidade de substituição entre variedades; e P_{jpt} e Π_{ipt} são os termos de resistência multilateral interna (do importador) e externa (do exportador), que capturam a dependência do comércio bilateral em relação aos custos enfrentados com todos os demais parceiros.

A presença de fluxos zero é comum em mercados regulados como o de biocombustíveis. Santos Silva e Tenreyro (2006) demonstram que o estimador de MQO, em log, é inconsistente na presença de heterocedasticidade e não comporta observações nulas. Este estudo adota o estimador PPML, que permite estimação em forma multiplicativa, é robusto à heterocedasticidade de forma desconhecida e incorpora observações com fluxos zero, conforme recomendado por Yotov et al. (2016) e por Larch, Shikher e Yotov (2025).

O problema de identificação central surge porque subsídios fósseis e mandatos de mistura são variáveis que operam no nível do importador em cada ano. Na prática padrão de estimação, efeitos fixos de importador-ano absorvem toda a variação dessas variáveis, o que é desejável para controlar os termos de resistência multilateral (Anderson e van Wincoop, 2003; Yotov et al., 2016), mas impede a estimação direta dos coeficientes das variáveis de política unilateral. Heid, Larch e Yotov (2021) formalizaram esse problema como a identificação de políticas não-discriminatórias no modelo gravitacional: políticas que afetam todos os parceiros comerciais de forma uniforme e, portanto, são colineares com os efeitos fixos de país-ano. Esse desafio é recorrente em estudos que investigam o efeito de variáveis como qualidade institucional, infraestrutura, liberdade econômica ou regulação ambiental sobre o comércio, e a solução proposta por Beverelli et al. (2024) replicada em aplicações sobre P&D e comércio (Freeman et al., 2025), facilitação comercial (Beverelli et al., 2023) e políticas ambientais (Larch, Shikher e Yotov, 2025).

A solução empregada é um procedimento em dois estágios que preserva a consistência com a teoria gravitacional. Na primeira etapa, a variável dependente é o fluxo bilateral de comércio em nível, estimado por PPML. As variáveis gravitacionais clássicas (distância, contiguidade, idioma comum, colonizador comum) são absorvidas pelos efeitos fixos de par

bilateral, que controlam todos os determinantes bilaterais invariantes no tempo. Os efeitos fixos de exportador-produto-ano e importador-produto-ano absorvem a produção, a despesa e os termos de resistência multilateral de Anderson e van Wincoop (2003). Os únicos regressores bilaterais que variam no tempo é a existência de acordo comercial regional (RTA) e tarifas. A inclusão simultânea dos três conjuntos de efeitos fixos segue as recomendações de Larch, Shikher e Yotov (2025). Os efeitos fixos do importador-produto-ano, estimados nessa etapa, capturam toda a variação na demanda multilateral do importador por cada produto em cada ano, controlada pela estrutura bilateral. Na segunda etapa, esses efeitos fixos são utilizados como variável dependente numa regressão OLS sobre as variáveis de política unilateral de interesse.

A primeira etapa estima:

$$Trade_{ijpt} = \exp[\beta_1 RTA_{ijt} + \beta_2 \ln(1 + tarifa_{ijpt}) + \theta_{ipt} + \mu_{jpt} + \delta_{ij}] \times \eta_{ijpt} \quad (2)$$

onde $Trade_{ijpt}$ representa o fluxo bilateral do exportador i para o importador j , no produto p e ano t , medido em níveis; RTA_{ijt} é a variável binária indicando a existência de acordo comercial regional entre i e j no ano t ; $tarifa_{ijpt}$; θ_{ipt} e μ_{jpt} são os efeitos fixos de exportador-produto-ano e importador-produto-ano, δ_{ij} são efeitos fixos de par bilateral. Os erros-padrão são agrupados (*cluster*) por par-produto.

A segunda etapa regride os efeitos fixos estimados do importador-produto-ano ($\hat{\mu}_{jpt}$) sobre as variáveis de política. O painel é colapsado para o nível importador-produto-ano (uma observação por combinação $j - p - t$):

$$\begin{aligned} \hat{\mu}_{jpt} = & \alpha_1 \ln(1 + SubFossil_{jt}) + \alpha_2 Mandate_{jpt} \\ & + \alpha_3 [\ln(1 + SubFossil_{jt}) \times Mandate_{jpt}] + Z'_{jt}\gamma + \varepsilon_{jpt} \end{aligned} \quad (3)$$

$SubFossil_{jt}$ mede os subsídios ao consumo de combustíveis fósseis no importador j no ano t (transformado em log); $Mandate_{jpt}$ é o percentual de mistura obrigatória do biocombustível correspondente ao produto p no importador j no ano t (*ethanol_pct* para etanol, *biodiesel_pct* para biodiesel); e Z_{jt} é um vetor de controles que inclui PIB per capita¹ em log, participação de renováveis na matriz energética² e contagem de intervenções restritivas³ do *Global Trade Alert*

¹ A variável dependente do segundo estágio (o efeito fixo estimado) contém toda a variação do importador em cada ano, incluindo renda, estrutura energética e ambiente regulatório. O PIB per capita é incluído como controle para isolar o efeito do mandato e do subsídio: países com renda mais alta podem simultaneamente adotar mandatos e demandar mais biocombustíveis por razões não ligadas à política (preferências ambientais, capacidade regulatória). Sem esse controle, o coeficiente do mandato capturaria tanto o efeito da política quanto o efeito de renda.

² A participação de renováveis na matriz energética controla a predisposição do país à transição energética, que correlaciona com a adoção de mandatos: países com matriz mais renovável podem ser mais dispostos a ter mandatos mais altos, e a omissão atribuiria ao mandato um efeito que decorre da composição prévia da matriz.

³ A variável de intervenção comercial (GTA Red) mede o número de intervenções restritivas implementadas pelo importador em cada ano. A base do GTA classifica cada intervenção como restritiva e identifica os produtos afetados por código HS. Para este estudo, a contagem é produto-específica: uma intervenção que afeta o HS 271019 (diesel) mas não o HS 382600 (biodiesel) é contabilizada apenas para derivados de petróleo, não para biocombustíveis. Essa desagregação permite que a variável capte o

(GTA). O parâmetro α_1 testa H1 (espera-se negativo: subsídio fóssil reduz importação de biocombustível); α_2 captura o efeito do mandato sobre a demanda de importação (sinal teoricamente ambíguo); e α_3 testa se o subsídio fóssil corrói o efeito do mandato. Espera-se $\alpha_1 < 0$: quanto maior o subsídio fóssil, menor a demanda por importação de biocombustíveis, uma vez que o preço relativo dos combustíveis convencionais cai e a competitividade das alternativas renováveis diminui.

O mesmo procedimento de dois estágios é aplicado ao painel de derivados de petróleo (HS 271000), substituindo a variável dependente pelo comércio bilateral de derivados. Nesse modelo, o sinal esperado de α_2 (mandato de mistura) é negativo se a hipótese H2 de deslocamento se verificar: se o mandato obriga a substituição de parte do diesel por biodiesel, a demanda por importação de diesel deveria diminuir. Para testar H3, aplica-se como robustez a abordagem de Freeman et al. (2025), que mantém o nível bilateral no segundo estágio e utiliza PPML com os custos bilaterais estimados do primeiro estágio como *offset*, permitindo incluir variáveis tanto do importador quanto do exportador. Os erros-padrão são agrupados por importador no procedimento Beverelli et al. (2024) e por par bilateral no procedimento Freeman et al. (2025). Além da especificação base, estimam-se duas variantes. A primeira inclui a interação entre mandato e subsídio ($\text{mandato} \times \ln(1 + \text{subsídio})$)⁴. A segunda substitui o termo linear do subsídio por uma especificação quadrática⁵.

As fontes de dados e a cobertura do painel⁶ estão sintetizadas na Tabela 1. A variável de intensidade do mandato foi construída a partir da IEA Policies Database e de relatórios USDA FAS Biofuels Annual, e a Tabela A2 no Apêndice documenta os mandatos por país e ano. As intervenções comerciais restritivas do Global Trade Alert foram desagregadas por produto HS, de modo que a contagem para cada importador-produto-ano reflete apenas as intervenções que afetam o produto específico.

Tabela 1. Fontes de dados e cobertura

Variável	Fonte	Cobertura	Período
Comércio bilateral	BACI/CEPII	HS 220710, 220720, 382600, 271000	2012-2024

protecionismo em energia, diferenciando entre intervenções direcionadas a combustíveis fósseis (por exemplo, restrições à exportação de petróleo) e intervenções direcionadas a biocombustíveis (como medidas antidumping sobre biodiesel, restrições fitossanitárias ao etanol). A variável entra como controle no segundo estágio para isolar o efeito do mandato e do subsídio da influência do ambiente de política comercial do importador, que pode afetar a demanda multilateral por biocombustíveis via barreiras não tarifárias.

⁴ Sem a interação, o modelo impõe que o efeito do subsídio é o mesmo para todos os níveis de mandato. A interação relaxa essa restrição e testa se o mandato atenua ou amplifica o efeito do subsídio. Um coeficiente negativo indica que o mandato compensa parcialmente a distorção de preço causada pelo subsídio.

⁵ O termo quadrático testa se o efeito do subsídio muda de intensidade conforme o nível do subsídio aumenta.

⁶ A estimação utiliza fluxos bilaterais para quatro posições do Sistema Harmonizado: HS 220710 (álcool etílico não desnaturado, teor alcoólico $\geq 80\%$ vol.), HS 220720 (álcool etílico e aguardentes desnaturados), HS 382600 (biodieseis e suas misturas) e HS 271000 (óleos de petróleo, exceto bruto). A posição HS 2207 pode incluir etanol para usos não energéticos, o que introduz algum ruído na variável dependente; por essa razão, uma das especificações de robustez exclui o HS 220710 (Tabela A2 no Apêndice).

Subsídios fósseis	IEA Fossil Fuel Subsidies Tracker	195 economias	2012-2024
Mandatos de mistura	IEA Policies + USDA FAS	50 países, por produto	2012-2024
Acordos comerciais	Egger e Larch	Pares bilaterais	2012-2024
Gravidade (validação do modelo)	CEPII Gravity	Distância, contiguidade, idioma	Invariante
Controles	World Bank WDI	PIB pc, renováveis	2012-2024
Intervenções	Global Trade Alert	Restrições comerciais	2012-2024
Tarifas	WITS (AHS)	5 produtos HS6	2012-2023

Elaboração própria.

O recorte temporal de 2012 a 2024 é determinado pela convergência de três fatores: a disponibilidade de dados de subsídios fósseis no *IEA Fossil Fuel Subsidies Tracker* (cobertura sistemática a partir de 2010, atualização até 2024), a cobertura dos relatórios *USDA FAS Biofuels Annual* (implementação efetiva dos mandatos a partir de 2012), e a revisão HS12 do Sistema Harmonizado (que entrou em vigor em 2012 e alterou a classificação de produtos energéticos). O ano inicial coincide com o início da expansão dos mandatos de biodiesel na Indonésia (B10), na Malásia (B5) e no Brasil (B5), garantindo variação temporal nas variáveis de política.

Dos 204 países no painel, 50 possuem mandatos de mistura documentados e 21 apresentam variação temporal na intensidade do mandato ao longo do período. Os demais países, sem mandato, entram na estimação do segundo estágio com valor zero para a variável de mandato e funcionam como grupo de controle. A identificação do efeito do mandato provém de três fontes de variação: entre países com e sem mandato, entre produtos dentro de um mesmo país (etanol e biodiesel possuem mandatos distintos), e temporal nos 21 países que alteraram o percentual de mistura. Na especificação com efeitos fixos de importador-produto, a variação *cross-sectional* é absorvida e a identificação depende das duas últimas fontes, o que reduz o poder da estimação e é discutido na seção de resultados.

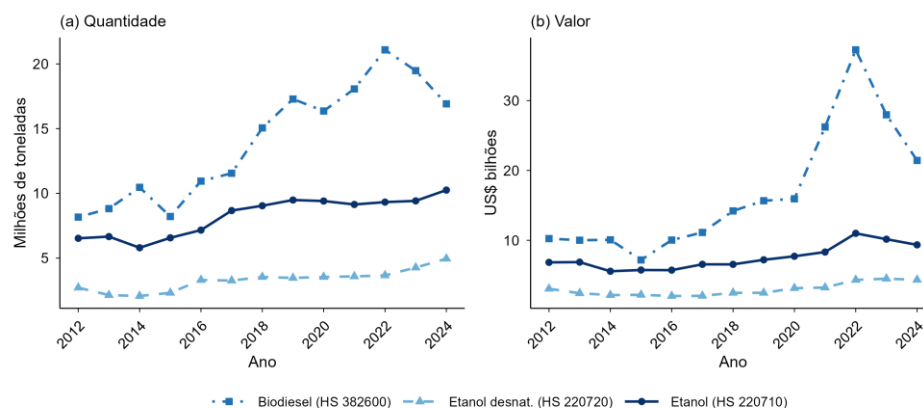
Como testes de robustez (Tabelas A2 a A5 no Apêndice), o estudo estima o modelo com: (i) dummy de mandato em vez de intensidade; (ii) exclusão do HS 220710, que pode incluir álcool etílico para usos não energéticos; (iii) exclusão das variáveis de intervenção do *Global Trade Alert*; (iv) exclusão do subsídio fóssil; e (v) extração dos efeitos fixos de uma especificação do primeiro estágio sem efeitos fixos de par bilateral, incluindo as variáveis gravitacionais tradicionais como regressores (Tabela A5). Nas Tabelas 2 e 6, a coluna (4) inclui efeitos fixos de importador-produto para captar variação *within*. Na abordagem Freeman et al. (2025), reportada na Tabela A4, aplica-se PPML bilateral com offset dos custos estimados e efeitos fixos de exportador, importador e ano. Os erros-padrão são agrupados por importador (ou exportador) no procedimento Beverelli e por par bilateral no procedimento Freeman.

4. Resultados

Antes de apresentar os resultados econométricos, é feita uma análise descritiva dos dados para contextualizar o comércio internacional de biocombustíveis. A Figura 1 apresenta a evolução do comércio por produto entre 2012 e 2024 em quantidade (painel a) e em valor (painel b). O biodiesel domina os fluxos e apresenta crescimento contínuo em volume, de 8 milhões de toneladas em 2012 para 17 milhões em 2024, refletindo o aumento dos mandatos na Europa e no Sudeste Asiático. Em valor, o biodiesel atinge US\$ 37 bilhões em 2022 e recua para US\$ 22 bilhões em 2024, mas esse padrão de pico e retração não se reproduz em quantidade, indicando que a volatilidade no valor decorre do choque de preços de

commodities agrícolas (soja, palma) em 2021-2022, não de uma redução nos volumes comercializados. O comércio de etanol (HS 220710 e 220720 somados) é mais estável em ambos os painéis, oscilando entre 8 e 14 milhões de toneladas e entre US\$ 8 bilhões e US\$ 15 bilhões ao longo do período, consistente com a maturidade do mercado e com a menor variação dos mandatos de etanol nos países da amostra.

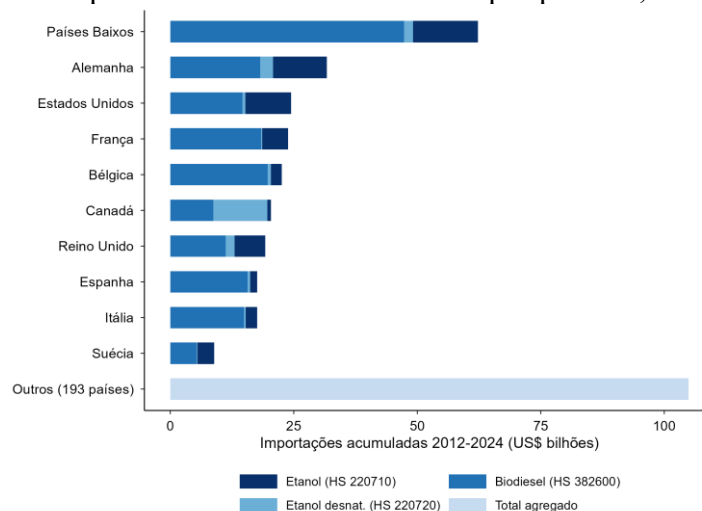
Figura 1. Comércio mundial de biocombustíveis por produto, 2012-2024 (US\$ bilhões)



Elaboração própria a partir de dados BACI/CEPII, IEA e USDA FAS.

A Figura 2 mostra que a composição por produto difere entre importadores e exportadores. Os Países Baixos lideram as importações (US\$ 62 bilhões acumulados), com participação de biodiesel, o que reflete o papel de Roterdã como porto de redistribuição para o mercado europeu. A Alemanha ocupa a segunda posição (US\$ 32 bilhões), também com predomínio de biodiesel, seguida por Estados Unidos (US\$ 26 bilhões) e França (US\$ 25 bilhões). O Canadá se distingue pela participação de etanol nas importações, consistente com a insuficiência de produção doméstica para atender o mandato federal e o *Clean Fuels Standard*. A concentração europeia entre os importadores (cinco dos dez maiores são membros da UE) reflete o efeito combinado da Diretiva de Energias Renováveis (RED) e da dependência de matérias-primas importadas (óleo de palma e soja) para a produção de biodiesel.

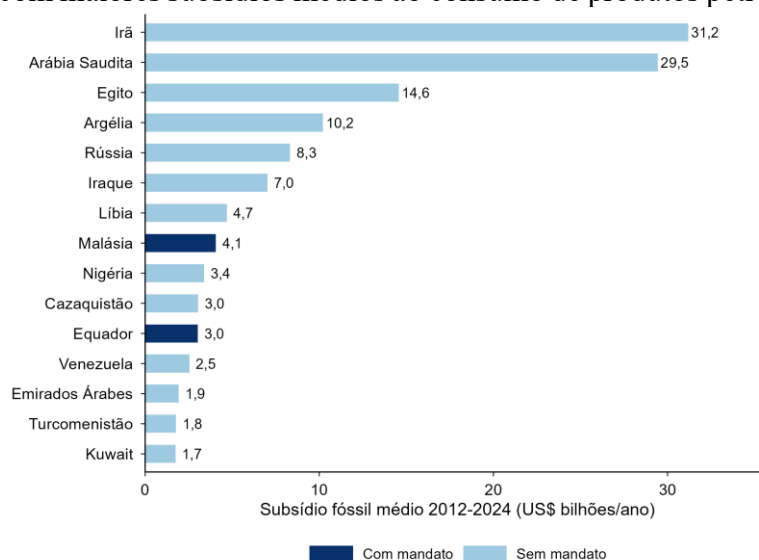
Figura 2. Dez maiores importadores de biocombustíveis por produto, 2012-2024



Elaboração própria a partir de dados BACI/CEPII, IEA e USDA FAS.

A distribuição dos subsídios fósseis na amostra concentra-se no Oriente Médio e no Norte da África. A Figura 3 apresenta os quinze países com maiores subsídios médios ao consumo de produtos petrolíferos. O Irã lidera com US\$ 31 bilhões anuais em média, seguido pela Arábia Saudita (US\$ 29 bilhões) e Egito (US\$ 15 bilhões). Rússia, Iraque, Líbia, Argélia e Nigéria completam o grupo, todos exportadores de petróleo que utilizam subsídios como instrumento de política doméstica de preço. A sobreposição entre países que subsidiam fósseis e países localizados em zonas de instabilidade geopolítica (Irã, Iraque, Líbia, Rússia) é consistente com o argumento de vulnerabilidade dos importadores que motiva este estudo, e esses países não são importadores de biocombustíveis, o que antecipa o sinal negativo do subsídio sobre a demanda por importação de biodiesel (H1).

Figura 3. Países com maiores subsídios médios ao consumo de produtos petrolíferos, 2012-2024

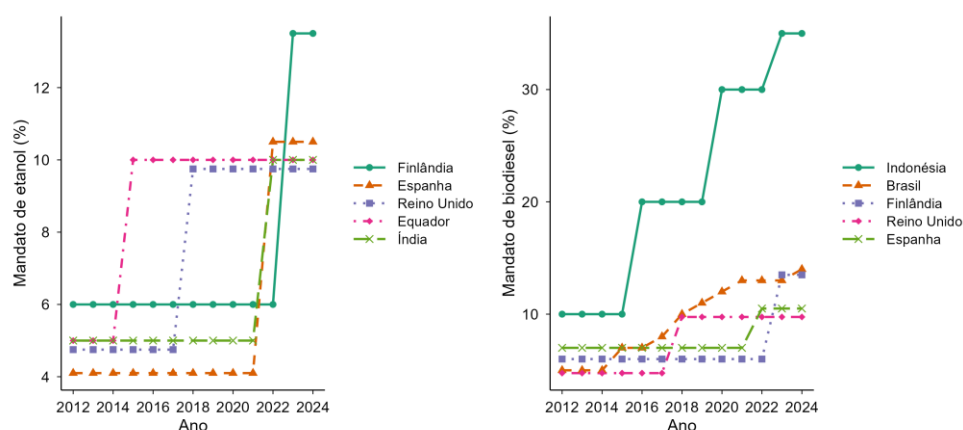


Elaboração própria a partir de dados do IEA Fossil Fuel Subsidies Tracker.

A variação temporal dos mandatos de mistura, que constitui a fonte de identificação no segundo estágio, é heterogênea entre países e entre produtos. A Figura 4 apresenta a evolução dos mandatos de etanol e biodiesel para os cinco países com maior variação temporal. No painel de biodiesel, a Indonésia apresenta a trajetória mais acentuada (de B10 em 2012 para B35 em 2023), seguida pelo Brasil (B5 para B14). No painel de etanol, a Índia apresenta a variação mais acentuada (de E5 para E20 entre 2012 e 2024).

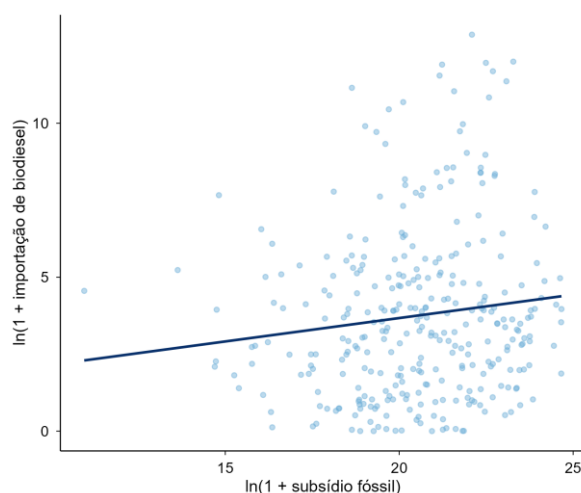
A Figura 5 apresenta a dispersão entre o logaritmo do subsídio fóssil e o logaritmo da importação de biodiesel para pares importador-ano com subsídio positivo. A relação é negativa: países com subsídios fósseis mais altos importam menos biodiesel. A dispersão é ampla, indicando que outros fatores (mandato, renda, capacidade de refino) também determinam as importações, o que justifica a abordagem multivariada do segundo estágio.

Figura 4. Evolução dos mandatos de mistura de etanol e biodiesel, países selecionados, 2012-2024 (%)



Elaboração própria a partir de dados da IEA Policies Database e USDA FAS Biofuels Annual.

Figura 5. Dispersão entre subsídio fóssil e importação de biodiesel (HS 382600), pares importador-ano com subsídio positivo



Elaboração própria a partir de dados BACI/CEPII, IEA e USDA FAS.

A Tabela 2 apresenta os resultados do primeiro estágio para biocombustíveis e derivados de petróleo. As colunas (1) e (2), sem efeitos fixos de par, servem de referência para comparação com a literatura do modelo gravitacional. As variáveis tradicionais apresentam sinais consistentes com a teoria nos dois painéis na coluna (1): a distância reduz o comércio bilateral (-1,239 para biocombustíveis e -1,195 para derivados, ambos significativos), a contiguidade aumenta os fluxos (0,600 e 0,620, também significativos), e acordos comerciais regionais têm efeito positivo para biocombustíveis (0,539, ao nível de 1%) mas não para derivados de combustíveis fósseis. As colunas (3) e (4) introduzem efeitos fixos de par bilateral, que absorvem todas as variáveis bilaterais invariantes no tempo. A tarifa muda de sinal entre as especificações: 2,051 na coluna (2) e -1,788 na coluna (4), onde o efeito fixo de par de países resolve a endogeneidade e o sinal negativo corresponde ao efeito causal (Baier e Bergstrand, 2007; Yotov et al., 2016). Para derivados, a variável não é significativa em nenhuma especificação.

Tabela 2. Gravidade estrutural (primeiro estágio)

	(1) Biocomb.	(2) Biocomb.	(3) Biocomb.	(4) Biocomb.	(1) Deriv.	(2) Deriv.
	Base	+ Tarifa	EF Par	EF Par + Tarifa	Gravitacional tradicional	+ Tarifa
RTA	0,539*** (0,158)	-0,198 (0,199)	-0,251 (0,251)	-0,083 (0,286)	0,070 (0,086)	0,045 (0,121)
ln(distância)	-1,239*** (0,094)	-1,069*** (0,123)	-	-	-1,195*** (0,048)	-1,315*** (0,071)
Contiguidade	0,600*** (0,185)	0,955** (0,453)	-	-	0,620*** (0,132)	0,381** (0,165)
Colonizador com.	1,574*** (0,259)	1,127** (0,540)	-	-	0,220 (0,160)	0,151 (0,183)
ln(1+tarifa/100)	-	2,051*** (0,764)	-	-1,788*** (0,650)	-	-0,435 (2,439)
Obs.	651.928	15.591	138.916	17.078	482.633	25.790

PPML com EF de par. Spec (3) oficial. CMQO (2) e (4): amostra restrita ao WITS. Cluster por par-produto. * $p < 0,10$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,01$.

A inclusão da tarifa na coluna (4) reduz o número de observações de 651.928 para 17.078 nos biocombustíveis e de 482.633 para 25.790 nos derivados, porque a cobertura do WITS é parcial e restrita a pares com comércio ativo, e o estimador PPML elimina os pares bilaterais que ficam com uma única observação (*singletons*) após a restrição da amostra. A perda de 97% da amostra na coluna (4) compromete a representatividade do painel para o segundo estágio, uma vez que os efeitos fixos do importador são estimados apenas para os pares com tarifa reportada⁷. Porque a variação temporal da tarifa dentro do par é limitada e a cobertura dos dados tarifários gera perda de amostra não aleatória, a especificação oficial adotada neste estudo é a coluna (3). Os efeitos fixos do importador e do exportador extraídos desta especificação alimentam o segundo estágio.

A Tabela 3 apresenta os resultados do segundo estágio para biocombustíveis (H1). A hipótese propõe que subsídios fósseis reduzem a demanda por importação de biocombustíveis ao tornar os combustíveis fósseis artificialmente baratos. O subsídio fóssil não é significativo no painel agregado (colunas 1 a 4). Por outro lado, o mandato de mistura apresenta coeficiente de 0,156, significativo nas especificações *pooled* (colunas 1 a 3): cada ponto percentual adicional no mandato está associado a 16,9%⁸ mais demanda multilateral por biocombustíveis. Com efeitos fixos de importador-produto (coluna 4), o mandato perde significância, confirmando que a identificação depende da variação *cross-sectional* entre países, conforme antecipado pela estabilidade temporal dos mandatos na Figura 4.

⁷ Larch, Shikher e Yotov (2025, p. 30) afirmam explicitamente que “most gravity regressions do not include tariffs” e listam três problemas: (i) dados pouco confiáveis, (ii) evasão tarifária gera viés, (iii) necessidade de agregação tarifária. Recomendamos pair FE com RTA como regressor bilateral.

⁸ $\exp(0,156) - 1 \approx 0,169$; a variável dependente é o efeito fixo estimado na escala log-linear e o mandato é em nível, portanto o coeficiente é uma semi-elasticidade.

Tabela 3. Subsídios fósseis e comércio de biocombustíveis, segundo estágio (H1)

	(1) Base	(2) Interação	(3) Quadrático	(4) Imp-prod FE	(5) Etanol	(6) Biodiesel
ln(1+subs. fóssil)	0,012 (0,018)	0,007 (0,020)	-0,185 (0,145)	0,016 (0,021)	0,038* (0,019)	-0,048 (0,036)
Mandato mistura (%)	0,156*** (0,041)	0,151*** (0,043)	0,155*** (0,041)	-0,008 (0,012)	-	-
Mandato produto (%)	-	-	-	-	0,208*** (0,071)	0,377*** (0,099)
Mandato-subs.	-	0,003 (0,003)	-	-	-	-
ln(1+subs.) ²	-	-	0,009 (0,007)	-	-	-
ln PIB pc imp.	0,453*** (0,161)	0,461*** (0,163)	0,462*** (0,159)	0,418 (0,309)	0,336** (0,150)	0,964*** (0,260)
% Renováveis (imp.)	0,019*** (0,007)	0,019*** (0,007)	0,020*** (0,007)	-0,028* (0,015)	0,021*** (0,007)	0,016 (0,012)
GTA Red (imp.)	0,096 (0,090)	0,101 (0,090)	0,097 (0,090)	-0,011 (0,018)	0,187** (0,084)	-0,189 (0,313)
Obs.	5.238	5.238	5.238	5.237	3.868	1.370

VD: EF importador-produto-ano. CMQO (1)-(3),(5)-(6): pooled MQO. Col (4): importador-produto FE. Cluster por importador. * p < 0,10; ** p < 0,05; *** p < 0,01.

A Tabela 4 aplica o procedimento Beverelli et al. (2024) ao lado do exportador de biocombustíveis (H3). O mandato do exportador é significativo nas especificações *cross-sectional* (0,154, colunas 1 a 3), o que indica que cada ponto percentual adicional no mandato está associado a 16,7% mais demanda multilateral do exportador ($\exp(0,154) - 1 \approx 0,167$). Nove dos dez maiores exportadores de biocombustíveis⁹ possuem mandatos de mistura, e esses países respondem por 94,8% do comércio mundial. O coeficiente captura o efeito acumulado das políticas nacionais que conectam mandato doméstico à capacidade exportadora: países que adotaram mandatos a mais tempo (como Brasil com B5 em 2008, Argentina com B8 em 2010, Indonésia com B10 em 2012) construíram capacidade de refino e logística que se traduz em excedente exportável. Com efeitos fixos de exportador-produto (coluna 4), o mandato perde significância, indicando que a identificação provém da comparação entre países. O subsídio fóssil do exportador apresenta sinal negativo (-0,030) mas não significativo, consistente com a concentração do subsídio em países que respondem por 5,2% das exportações (Malásia, Paquistão, Bolívia, Rússia).

Tabela 4. Mandato do exportador e exportações de biocombustíveis (H3)

	(1) Base	(2) Interação	(3) Quadrático	(4) Exp-prod FE
ln(1+subs. fóssil exp.)	-0,030 (0,031)	-0,044 (0,036)	-0,183 (0,276)	0,033 (0,029)
Mandato mistura (% exp.)	0,154*** (0,037)	0,145*** (0,038)	0,153*** (0,037)	-0,001 (0,026)
ln PIB pc exportador	0,429** (0,197)	0,448** (0,201)	0,432** (0,198)	-0,595 (0,610)
% Renováveis (exp.)	-0,006 (0,009)	-0,006 (0,009)	-0,005 (0,009)	0,001 (0,032)
GTA Red (exp.)	0,327*** (0,093)	0,333*** (0,094)	0,327*** (0,093)	0,045*** (0,014)
Mandato × Subs. (exp.)	-	0,006 (0,004)	-	-

⁹ Os dez maiores exportadores são: Países Baixos, Estados Unidos, Alemanha, Bélgica, Brasil, Espanha, Argentina, França, Indonésia e China. A Alemanha aparece sem mandato na base porque o sistema alemão (THG-Quote) opera por metas de redução de emissões de gases de efeito estufa, não por percentual volumétrico de mistura.

ln(1+subs. exp.) ²	-	-	0,007 (0,013)	-
Obs.	3.094	3.094	3.094	3.081

VD: EF exportador-produto-ano. Cluster por exportador. * p < 0,10; ** p < 0,05; *** p < 0,01.

A Tabela 5 testa a hipótese de deslocamento (H2): se mandatos de mistura substituem parte do diesel por biodiesel, a demanda por importação de derivados de petróleo deveria diminuir. O mandato é significativo e positivo nas especificações *cross-sectional* (0,081, colunas 1 a 3), o que indica que países com mandatos de mistura importam mais derivados, não menos. O sinal positivo reflete o fato de que as maiores economias com mandato (EUA, China, Japão, Índia, Reino Unido, França, Itália, Brasil, Canadá, entre outros) concentram as maiores frotas de veículos do mundo e demandam derivados em larga escala, independentemente da política de biocombustíveis. O mandato altera a composição da mistura sem reduzir o volume agregado de derivados que transita no comércio internacional. Com efeitos fixos de importador (coluna 4), o mandato perde significância, confirmando que o coeficiente positivo das colunas anteriores reflete características fixas do país, não um efeito causal. O GTA produto-específico é significativo (0,319): intervenções comerciais restritivas em derivados de petróleo estão associadas a maior demanda multilateral, refletindo que países que impõem barreiras são os mesmos que dependem de importações de derivados. No *within* (coluna 4), o GTA torna-se negativo (-0,034, significativo), indicando que aumentos no número de intervenções dentro de um mesmo país ao longo do tempo reduzem a demanda por derivados importados. O subsídio fóssil não é significativo. A hipótese H2 não encontra sustentação.

Tabela 5. Mandatos e comércio de derivados de petróleo, importador (H2)

	(1) Base	(2) Interação	(3) Quadrático	(4) Imp FE
Mandato mistura (%)	0,081*** (0,015)	0,081*** (0,016)	0,080*** (0,015)	-0,014 (0,011)
ln(1+subs. fóssil)	0,007 (0,016)	0,008 (0,018)	-0,154 (0,143)	-0,003 (0,014)
ln PIB pc imp.	0,182* (0,098)	0,182* (0,098)	0,190* (0,096)	0,653*** (0,193)
% Renováveis (imp.)	0,005 (0,005)	0,005 (0,005)	0,006 (0,005)	-0,042*** (0,012)
GTA Red (imp.)	0,319*** (0,060)	0,319*** (0,060)	0,327*** (0,061)	-0,034* (0,018)
Obs.	2.085	2.085	2.085	2.085

VD: EF importador-ano (HS 271000). Cluster por importador. * p < 0,10; ** p < 0,05; *** p < 0,01.

A Tabela 6 mostra os resultados estimados ao lado do exportador de derivados de petróleo. Na comparação entre países (colunas 1 a 3), o subsídio fóssil (0,168), o mandato (0,208) e o GTA (0,704) são significativos. O subsídio capta o perfil dos grandes produtores de petróleo (Arábia Saudita, Irã, Rússia), que subsidiam o consumo doméstico e exportam o excedente. O mandato capta economias que combinam capacidade de refino com política de biocombustíveis, como Estados Unidos, Brasil e Índia. O GTA é o preditor mais forte: cada intervenção restritiva adicional está associada a 102% mais exportações de derivados ($exp(0,704) - 1 \approx 1,02$; a variável é uma contagem e o efeito fixo está na escala log-linear). O termo quadrático (0,012, significativo) indica que o efeito do subsídio se intensifica em níveis altos. Com efeitos fixos de exportador (coluna 4), subsídio, mandato e GTA perdem

significância, ou seja, os coeficientes das colunas anteriores capturam diferenças entre países, não mudanças ao longo do tempo. A Tabela 7 sintetiza os resultados das três hipóteses testadas.

Tabela 6. Mandato e subsídio do exportador, derivados de petróleo (H3)

	(1) Base	(2) Interação	(3) Quadrático	(4) Exp FE
ln(1+subs. fóssil exp.)	0,168*** (0,020)	0,177*** (0,022)	-0,084 (0,142)	0,015 (0,023)
Mandato mistura (% exp.)	0,208*** (0,034)	0,217*** (0,037)	0,207*** (0,034)	-0,022 (0,017)
Mandato-subs. (exp.)	-	-0,005 (0,003)	-	-
ln(1+subs. exp.) ²	-	-	0,012* (0,006)	-
ln PIB pc exp.	0,933*** (0,183)	0,919*** (0,184)	0,944*** (0,182)	0,912** (0,419)
% Renováveis (exp.)	0,011 (0,010)	0,010 (0,010)	0,012 (0,010)	-0,079*** (0,022)
GTA Red (exp.)	0,704*** (0,140)	0,688*** (0,143)	0,717*** (0,139)	-0,012 (0,040)
Obs.	2.045	2.045	2.045	2.044

VD: EF exportador-ano (HS 271000). Cluster por exportador. * p < 0,10; ** p < 0,05; *** p < 0,01.

Tabela 7. Síntese dos resultados por hipótese

Hipótese	Variável	Painel	Coef.	Resultado
H1	Subs. fóssil (imp.)	Biodiesel	-0,048	Sem diferença de zero
H1	Subs. fóssil (imp.)	Etanol	0,038*	Positivo (10%)
H1	Mandato (imp.)	Bio agregado	0,156***	Aumenta importação
H3	Mandato (exp.)	Biocombustível	0,154***	Estimula exportação
H2	Mandato (imp.)	Derivados	0,081***	Sem deslocamento (imp.)
H3	Subs. fóssil (exp.)	Derivados	0,168***	Aumenta exportação
H3	Mandato-subs. (exp.)	Derivados	-0,005	Não significativo
H3	Mandato (exp., within)	Derivados	-0,022	Não significativo

* p < 0,10; ** p < 0,05; *** p < 0,01. within = EF de exportador.

Os testes de robustez (Tabelas A3 a A6 no Apêndice) confirmam a estabilidade dos resultados. O mandato de mistura é significativo em todas as especificações alternativas, tanto para biocombustíveis (entre 0,155 e 0,157, Tabela A3) quanto para derivados (entre 0,080 e 0,089, Tabela A4). Com *dummy* de mandato, países com mandato apresentam demanda multilateral 24,8 vezes maior para biocombustíveis e 4,5 vezes maior para derivados ($\exp(3,209) \approx 24,8$; $\exp(1,515) \approx 4,5$). A Tabela A5 apresenta a abordagem Freeman et al. (2025): o subsídio do importador é negativo para derivados (-0,017, significativo) e o mandato do exportador reduz exportações de biocombustíveis (-0,046, significativo). A Tabela A6 confirma a robustez à escolha do primeiro estágio.

5 Considerações finais

Este estudo investigou como subsídios a combustíveis fósseis e mandatos de mistura afetam o comércio internacional de biocombustíveis e derivados de petróleo, combinando painéis gravitacionais com o procedimento de dois estágios proposto por Beverelli et al. (2024) e Heid, Larch e Yotov (2021), com extensão para o lado do exportador.

Foram levantadas três hipóteses sobre a relação entre políticas energéticas e comércio internacional de combustíveis. A hipótese H1 propunha que subsídios fósseis reduzem a demanda por importação de biocombustíveis. Os resultados indicam que o efeito depende do produto: o subsídio é negativo para biodiesel e positivo para etanol, refletindo a competição direta entre biodiesel e diesel subsidiado, que não se reproduz no mercado de etanol e gasolina. No painel agregado, o subsídio não é

significativo. O mandato de mistura é o instrumento com efeito mais robusto: cada ponto percentual adicional está associado a 16,9% mais demanda por biocombustíveis importados e 16,7% mais capacidade exportadora, indicando que a política regulatória molda tanto a demanda do importador quanto a oferta do exportador. A hipótese H2 propunha que mandatos deslocam importações de derivados de petróleo. Os resultados rejeitam essa hipótese: o mandato altera a composição da mistura, mas não reduz o volume de derivados no comércio internacional. A hipótese H3 propunha que mandatos e subsídios do exportador afetam as exportações. Na comparação entre países, mandatos e subsídios do exportador de derivados são significativos, mas perdem significância na variação temporal dentro de cada exportador, indicando que os coeficientes capturam diferenças estruturais entre países produtores, não efeitos causais de mudanças na política ao longo do tempo.

No contexto em que conflitos geopolíticos (Rússia-Ucrânia, tensões no Oriente Médio) elevam a volatilidade dos preços do petróleo e renovam o interesse em segurança energética, os resultados apontam que mandatos de biocombustíveis não substituem importações de derivados. A segurança energética proporcionada por mandatos opera pela diversificação da matriz de combustíveis doméstica, não pela redução da dependência de fornecedores externos de petróleo. Se o objetivo é reduzir a vulnerabilidade a choques de preço, o mandato precisa ser complementado pela reforma dos subsídios fósseis, que neutralizam parcialmente a competitividade do biodiesel frente ao diesel subsidiado.

O painel de intensidade de mandatos por produto, país e ano, uma contribuição do estudo, é disponibilizado para replicação. Os resultados abrem três agendas de pesquisa. A primeira é a dimensão temporal: como a maioria dos países manteve mandatos estáveis entre 2012 e 2024, a identificação depende da variação entre países. A onda de revisões de mandatos prevista para o período 2025-2030 (RED III na Europa, RenovaBio no Brasil, mandatos no Sudeste Asiático) deve gerar variação temporal que permita estimações *within* com maior poder. A segunda é a heterogeneidade por rota tecnológica: o estudo agrega biodiesel de soja, palma e canola num único código HS, mas a competição com o diesel subsidiado pode diferir conforme a matéria-prima e o custo de produção. Dados desagregados por rota (biodiesel convencional, diesel renovável, combustível sustentável de aviação) permitiriam testar se o efeito do subsídio varia conforme a tecnologia de produção do biocombustível. A terceira é a extensão para biocombustíveis avançados e combustíveis sustentáveis de aviação (SAF), que estão fora do escopo deste estudo por não terem fluxos bilaterais consolidados no período amostral, mas que devem ganhar relevância comercial com os mandatos de SAF em discussão na Europa e nos Estados Unidos.

Referências

- Anderson, J. E. (1979). A theoretical foundation for the gravity equation. *The American Economic Review*, 69(1), 106-116.
- Anderson, J. E., & van Wincoop, E. (2003). Gravity with gravitas: A solution to the border puzzle. *American Economic Review*, 93(1), 170-192.
- Apanisile, O. T., & Oyelami, B. O. (2025). How harmful are fossil fuel subsidies to the diffusion of low-carbon energy technologies? *Energy Economics*, 142, 108168.
- Argueyrolles, R., et al. (2025). Impact of gasoline and diesel subsidy reforms on global biofuel mandates. *GCB Bioenergy*, 17(2), e70019. <https://doi.org/10.1111/gcbb.70019>

- Baier, S. L., & Bergstrand, J. H. (2007). Do free trade agreements actually increase members' international trade? *Journal of International Economics*, 71(1), 72-95. <https://doi.org/10.1016/j.jinteco.2006.02.005>
- Baldwin, R., & Taglioni, D. (2006). Gravity for dummies and dummies for gravity equations. NBER Working Paper 12516.
- Beverelli, C., et al. (2023). Trade facilitation and exports: Evidence from the structural gravity model. *Review of International Economics*, 31(4), 1213-1232.
- Beverelli, C., et al. (2024). Institutions, trade, and development: Identifying the impact of country-specific characteristics on international trade. *Oxford Economic Papers*, 76(2), 469-494.
- Burniaux, J.-M., et al. (2011). The trade effects of phasing out fossil-fuel consumption subsidies. *OECD Trade and Environment Working Papers*, 2011/05.
- Caldara, D., & Iacoviello, M. (2022). Measuring geopolitical risk. *American Economic Review*, 112(4), 1194-1225. <https://doi.org/10.1257/aer.20191823>
- Energy Institute. (2024). *Statistical review of world energy 2024* (73rd ed.).
- European Commission. (2018). Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources. *Official Journal of the European Union*, L 328/82.
- European Parliament. (2023). Directive (EU) 2023/2413 amending Directive (EU) 2018/2001 (RED III). *Official Journal of the European Union*, L 2023/2413.
- Ferrari Minesso, M., et al. (2024). Geopolitical risk and oil prices. *ECB Economic Bulletin*, Issue 8/2023, Box 2.
- Freeman, R., et al. (2025). Unlocking new methods to estimate country-specific effects and trade elasticities with the structural gravity model. *Journal of Applied Econometrics*, 40(6), 669-684.
- Gorter, H. de, & Just, D. R. (2010). The social costs and benefits of biofuels. *Applied Economic Perspectives and Policy*, 32(1), 4-32.
- Heid, B., et al. (2021). Estimating the effects of non-discriminatory trade policies within structural gravity models. *Canadian Journal of Economics*, 54(1), 376-409.
- IEA. (2023). *Fossil fuels consumption subsidies 2022*.
- IEA. (2024a). *Renewables 2024: Analysis and forecast to 2030*.
- IEA. (2024b). *Renewables 2023*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>
- INESC. (2025). *Resumo executivo: Subsídios às fontes fósseis e renováveis (2023-2024)* (8^a ed.).
- Kojima, M. (2016). Fossil fuel subsidy and pricing policies (Policy Research Working Paper No. 7531). World Bank.
- Lamers, P., et al. (2011). International bioenergy trade: A review of past developments in the liquid biofuel market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2655-2676.
- Larch, M., et al. (2025). Estimating gravity equations: Theory implications, econometric developments, and practical recommendations. *Review of International Economics*, 33(5), 1066-1092.
- Lundberg, L., et al. (2023). The impact of blending mandates on biofuel consumption, production, emission reductions and fuel prices. *Energy Policy*, 183, 113835.
- OECD/FAO. (2025). *Biofuels*. In *OECD-FAO Agricultural Outlook 2025-2034*. OECD Publishing.
- OMC. (2024). *Fossil Fuel Subsidy Reform Initiative: Work Plan 2024-2025*. WT/MIN(24)/19.
- Parry, I., et al. (2025). *Underpriced and overused: Fossil fuel subsidies data 2025 update* (IMF Working Paper).
- REN21. (2024). *Renewables 2024 Global Status Report*. REN21 Secretariat.
- Salamon, P., et al. (2006). Renewable energy: New forces in global ethanol trade? *EAAE 98th Seminar paper*.
- Santos Silva, J. M. C., & Tenreyro, S. (2006). The log of gravity. *The Review of Economics and Statistics*, 88(4), 641-658.
- Tao, M., et al. (2025). Global oil trading networks: Structural patterns and geopolitical risks. *Energy Economics*. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2025.108323>
- Tinbergen, J. (1962). *Shaping the world economy*. Twentieth Century Fund.
- USDA FAS. (2024). *Biofuels Annual reports*. U.S. Department of Agriculture.
- Verkuijl, C. et al. (2024). Revitalizing international fossil fuel subsidy phase-out commitments. *npj Climate Action*, 3, 63.
- Yotov, Y. V., et al. (2016). An advanced guide to trade policy analysis: The structural gravity model. *WTO*.

Apêndice

Tabela A1. Estatísticas descritivas

Variável	Obs.	Média	Desv. padrão	Mín.	Máx.
Painel de biocombustíveis (segundo estágio, importador-produto-ano)					
EF importador (Stage 1)	6.702	-4,56	3,73	-22,74	11,51
Mandato mistura total (%)	7.956	2,66	5,92	0	41
Mandato produto-específico (%)	7.956	1,36	3,39	0	35
Subsídio fóssil (USD milhões)	7.956	665	3.688	0	51.480
PIB per capita (USD)	7.815	16.670	22.374	219	142.855
Renováveis na matriz (%)	6.252	29,75	28,17	0	97,0
GTA Red (n. intervenções)	7.956	0,18	1,10	0	31
Painel de biocombustíveis (segundo estágio, exportador-produto-ano)					
EF exportador (Stage 1)	4.049	-6,35	4,23	-27,30	2,78
Mandato mistura total (% exp.)	7.956	2,66	5,92	0	41
Subsídio fóssil exportador (USD milhões)	7.956	665	3.688	0	51.480
PIB per capita exportador (USD)	7.815	16.670	22.374	219	142.855
Renováveis na matriz (% exp.)	6.252	29,75	28,17	0	97,0
GTA Red exportador (n. intervenções)	7.956	0,18	1,10	0	31
Painel de derivados de petróleo (segundo estágio, importador-ano)					
EF importador (Stage 1)	2.702	-1,91	1,86	-12,30	2,19
Mandato mistura total (%)	2.704	2,61	5,88	0	41
Subsídio fóssil (USD milhões)	2.704	652	3.654	0	51.480
PIB per capita (USD)	2.616	16.688	22.334	219	142.855
Renováveis na matriz (%)	2.095	29,60	28,18	0	97,0
GTA Red (n. intervenções)	2.704	0,25	1,42	0	35
Painel de derivados de petróleo (segundo estágio, exportador-ano)					
EF exportador (Stage 1)	2.635	-5,37	4,30	-18,39	2,11
Mandato mistura total (% exp.)	2.704	2,61	5,88	0	41
Subsídio fóssil exportador (USD milhões)	2.704	652	3.654	0	51.480
PIB per capita exportador (USD)	2.616	16.688	22.334	219	142.855
Renováveis na matriz (% exp.)	2.095	29,60	28,18	0	97,0
GTA Red exportador (n. intervenções)	2.704	0,25	1,42	0	35

Elaboração própria. Estatísticas referem-se aos painéis colapsados do segundo estágio.

Tabela A2. Mandatos de mistura de biocombustíveis por país, 2012-2024

País	Região	Etanol	Biodiesel	Varição no período
Brasil	LAC	E27-E30	B5-B15	Etanol: E20(12)-E27(15)-E30(25). Biodiesel: B5(12)-B14(24)-B15(25)
Argentina	LAC	E12	B7,5	Etanol: E5(10)-E12(16). Biodiesel: B5(10)-B10(14)-B7,5(22)
Colômbia	LAC	E10	B10	Etanol variou E4-E10. Biodiesel estável B10
Peru	LAC	E7,8	B5	Sem variação. B5 suspenso temporariamente 2022
Paraguai	LAC	E25	B1	Sem variação. Mistura efetiva < 1%
EUA	NAM	~12-13%	RFS vol.	RFS volumétrico. Etanol: 10%(12)-13%(25)
Canadá	NAM	E5 (fed.)	2% (fed.)	CFR desde jul. 2023
México	LAC	5,8-10%	Nenhum	Teto, não mandato
Indonésia	ASEA	E5 (lim.)	B10-B40	B10(12)-B20(16)-B30(20)-B35(23)-B40(25)
Índia	SSEA	E5-E20	Nenhum	E5(12)-E10(22)-E15(23)-E20(24)
China	EA	E10 (form.)	Nenhum	Mistura efetiva 2-3%
Tailândia	ASEA	E10-E20	B5-B7	E85 eliminado 2024. Foco em EVs
Malásia	ASEA	Nenhum	B10	B5(12)-B10(18)
Japão	EA	~1,9%	Nenhum	Mandato via ETBE
Coreia do Sul	EA	Nenhum	B2,5-B3,5	B2,5(15)-B3,5(22)
Filipinas	ASEA	E10	B2	E5(07)-E10(11)
Vietnã	ASEA	E10	Nenhum	E10 desde dez. 2017
Taiwan	EA	E3 (piloto)	Nenhum	B2 encerrado 2014
UE-27	EUR	Variável	Variável	RED(09): 10% 2020. RED II(18): 14% 2030
Turquia	WAS	E3	Nenhum	E3 desde 2012
Reino Unido	EUR	~14%	~14%	RTFO combinado crescente
Noruega	EUR	19% (comb.)	19% (comb.)	Mandato combinado alto
África do Sul	AFR	2-10%	B5	Regulação desde 2015
Moçambique	AFR	E10 (2024)	B3 (2024)	E10(24)-E20(33), B3(24)-B10(33)

Elaboração própria a partir de IEA Policies Database e USDA FAS Biofuels Annual (várias edições). LAC = América Latina; NAM = América do Norte; ASEA = Sudeste Asiático; SSEA = Sul da Ásia; EA = Leste Asiático; EUR = Europa; WAS = Ásia Ocidental; AFR = África.

Tabela A3. Robustez: biocombustíveis (importador)

	(R1) Sem 220710	(R2) Dummy	(R3) Sem GTA	(R4) Sem subfossil
ln(1+subs. fóssil)	0,005 (0,023)	0,020 (0,017)	0,007 (0,020)	-
Mandato mistura (%)	0,157*** (0,054)	-	0,155*** (0,043)	0,155*** (0,041)
Mandato (dummy)	-	3,209*** (0,365)	-	-
Mandato-subs.	0,004 (0,004)	-	0,003 (0,003)	-
ln PIB pc imp.	0,629*** (0,185)	0,314** (0,154)	0,461*** (0,163)	0,444*** (0,160)
% Renováveis (imp.)	0,017** (0,008)	0,020*** (0,007)	0,019*** (0,007)	0,018*** (0,007)
GTA Red (imp.)	0,052 (0,125)	0,050 (0,078)	-	0,094 (0,090)
Obs.	3.286	5.238	5.238	5.238

Pooled MQO. Cluster por importador. * p < 0,10; ** p < 0,05; *** p < 0,01.

Tabela A4. Robustez: derivados de petróleo (importador)

	(R1) Dummy	(R2) Sem GTA	(R3) Sem subfossil	(R4) Subfossil only
Mandato (dummy)	1,515*** (0,201)	-	-	-
Mandato mistura (%)	-	0,089*** (0,016)	0,080*** (0,015)	-
ln(1+subs. fóssil)	0,010 (0,015)	0,008 (0,016)	-	-0,002 (0,015)
ln PIB pc imp.	0,126 (0,099)	0,179* (0,099)	0,178* (0,095)	0,658*** (0,193)
% Renováveis (imp.)	0,005 (0,005)	0,004 (0,005)	0,004 (0,005)	-0,042*** (0,012)
GTA Red (imp.)	0,231*** (0,053)	-	0,321*** (0,061)	-0,035* (0,018)
Obs.	2.085	2.085	2.085	2.085

(R1)-(R3): pooled MQO. (R4): importador FE. Cluster por importador. * p < 0,10; ** p < 0,05; *** p < 0,01.

Tabela A5. Freeman et al. (2025): PPML bilateral

	(1) Bio: base	(2) Bio: completo	(3) Fóssil: base	(4) Fóssil: completo
Mandato (% imp.)	0,001 (0,009)	-0,001 (0,009)	-0,005 (0,007)	-0,006 (0,007)
ln(1+subs. imp.)	-0,023 (0,019)	-0,024 (0,019)	-0,017** (0,009)	-0,017** (0,009)
Mandato (% exp.)	-	-0,046*** (0,015)	-	-0,006 (0,006)
ln(1+subs. exp.)	-	0,000 (.)	-	-0,011*** (0,003)
Obs.	106.832	106.832	173.329	173.329

PPML bilateral. Custos bilaterais estimados no primeiro estágio como componente fixo. EF: exp - imp - ano. Cluster por par. Colunas (1) e (3): apenas variáveis do importador. Colunas (2) e (4): variáveis do importador e do exportador. * p < 0,10; ** p < 0,05; *** p < 0,01.

Tabela A6. Robustez: primeiro estágio sem efeitos fixos de par bilateral

	(1) Bio: base	(2) Bio: interação	(3) Fóssil: base	(4) Fóssil: interação
ln(1+subs. fóssil)	0,020 (0,021)	0,023 (0,023)	0,019 (0,018)	0,016 (0,020)
Mandato mistura (%)	0,202*** (0,048)	0,205*** (0,053)	0,109*** (0,018)	0,105*** (0,019)
Mandato-subs.	-	-0,002 (0,004)	-	0,002 (0,002)
ln PIB pc imp.	0,750*** (0,175)	0,744*** (0,179)	0,259** (0,115)	0,266** (0,115)
Obs.	4.985	4.985	1.965	1.965

VD: EF do Stage 1 sem pair FE (com variáveis gravitacionais). Cluster por importador. * p < 0,10; ** p < 0,05; *** p < 0,01.